МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК. 621.313.17:519.87 DOI 10.12737/19688

Обзор подходов к снижению пульсаций электромагнитного момента вентильно-индукторного двигателя методами математического моделирования*

Н. Ф. Карнаухов[1], М. Н. Филимонов[2], Д. А. Статовой[3], А. С. Лыков[4]**
[1, 2, 3, 4]Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

A review of torque ripple reducing methods based on mathematical simulation***

N. F. Karnaukhov[1], M. N. Filimonov[2], D. A. Statovoy[3], A. S. Lykov[4]**
[1, 2, 3, 4]Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Предметом данного исследования являются методы управления моментом вентильно-индукторного двигателя. Цель работы — обзор существующих методов снижения электромагнитных пульсаций на валу вентильно-индукторного двигателя. Для классификации методов управления электромагнитным моментом использовался сравнительный анализ существующих подходов к построению систем управления вентильными приводами. Результаты исследования могут применяться при выборе метода управления приводом, обеспечивая баланс между сложностью реализации системы управления и ее эффективностью. На основе сравнительного анализа сделаны выводы об эффективности нейросетевых систем управления моментом с оффлайн обучением, отмечены возможности улучшения данных систем с помощью управления коэнергией магнитной системы привода а также внесения в модель эффектов остаточной намагниченности материалов. Отмечено, что существующие системы, нивелирующие намагниченность материалов привода, снижают средний момент за цикл работы.

The subject of this investigation is the methods of switched reluctance motors controlling. The study objective is to review the existing methods of reducing shaft electromagnetic torque ripple in the switched reluctance motors. A comparative analysis of the existing approaches to valve drives control systems development is used to classify the electromagnetic torque control methods. The study results can be used when selecting the drive control method providing a balance between the complexity of the control system implementation and its effectiveness. On the basis of the comparative analysis, the conclusions on the neural network torque control systems effectiveness with offline learning are made; the control system enhancement using co-energy magnetic drive system as well as the inclusion of the residual magnetization material effects in the model is marked. It is noted that the existing systems aligning the magnetization of the actuator materials reduce the average torque for the work cycle.

Ключевые слова: вентильно-индукторный двигатель, технологическая машина; метод снижения пульсаций; малая и ползучая скорость; исполнительный механизм; математическая модель; моделирование.

Keywords: switched reluctance motor, production machine, method of reducing torque ripple, slow and creep speed, executive mechanism, mathematical model, modeling.

Введение. Создание современных технологических машин (ТМ), включая промышленные роботы (ПР) широкого назначения, сопряжено с выбором привода и оценкой его технических возможностей — например, для реализации особых режимов работы электропривода и обеспечения нормативов технологического процесса. В настоящее время ведутся поиски схемотехнических решений по управлению вентильно-индукторным двигателем (ВИД). Исследуются возможности его применения в электроприводах промышленных роботов (ПР), другом технологическом обо-

*Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
**E-mail: nika811@bk.ru, maxfil2006@yandex.ru, dr-monro@mail.ru, antonlykov.anton@gmail.com
***The research is done within the frame of the independent R&D.

рудовании (ТО), станочных и робототехнических системах (РТС). Известно [1, 2], что особенностью в работе упомянутых электроприводов является обеспечение повторно-кратковременных режимов и поддержание равномерности вращения (перемещения) исполнительного механизма (ИМ) рабочего органа (РО) в зоне малой скорости. При ряде хороших технических показателей ВИД и универсальности известных схем управления ими [3] существует некоторая проблема целевого применения таких двигателей в ТМ из-за наличия пульсирующих моментов на валу в зоне малой скорости перемещения ИМ. По мнению авторов, поиск приемлемого решения возможен. Он должен базироваться на взаимосвязи всех составляющих ТМ: механических, электрических, информационных, в целом определяющих технические характеристики и работоспособность ТМ. Решение задачи повышения равномерности движения и стабильности позиционирования ИМ с электроприводом на базе ВИД является важнейшим ориентиром при выборе электропривода ТМ, способного программно работать с заданными характеристиками в зоне низких и ползучих скоростей движения ИМ.

Постановка задачи. С развитием мультипроцессорных систем управления (МСУ) ТМ расширяются возможности обеспечения требований технологических режимов, усложняются алгоритмы работы ключевых элементов импульсного преобразователя (ИП) для формирования целесообразных законов разгона и торможения ВИД. Анализ ряда статей [4–7], рассматривающих возможность снижения пульсирующих моментов на валу ВИД с математическим обоснованием, показывает, что каждый метод имеет определенные преимущества и недостатки, затрудняющие окончательный выбор математического описания, например, системы управления конкретного ВИД с заданными параметрами и приемлемыми механическими характеристиками. Разброс суждений не позволяет пока дать однозначную оценку методам снижения уровня пульсирующих моментов на валу и схемотехническим решениям для повышения эффективности преобразования электроэнергии.

Подходы к решению задачи. Очевидная целесообразность применения ВИД в различных сферах деятельности человека обусловлена рядом достоинств его технических характеристик. Однако в электроприводах ТМ — в частности, в электроприводах промышленных роботов (ПР), другом технологическом оборудовании (ТО), станочных и робототехнических системах (РТС) ВИД используется недостаточно — как правило, на стадии разработки, экспериментальных исследований и пробных внедрений в электроприводы технологического оборудования (ТО) [2]. Поэтому в представленной статье особое внимание уделяется сравнительному обзору известных подходов к решению задачи, проводится анализ алгоритмов управления ВИД и предлагается примерное структурирование методов управления, позволяющих снизить пульсации момента на валу двигателя и повысить равномерность движения ИМ ТМ.

В настоящее время подходы к решению задачи снижения пульсаций момента на валу ВИД условно можно отнести к одной из двух групп.

— К первой относятся методы, определяемые изменением конструктивных параметров обмоток статора и ротора, технологиями изготовления магнитопроводов статора и ротора.

— Методы второй группы основаны на совершенствовании алгоритмов управления коммутацией обмоток, которые, в свою очередь, подразделяются на техники непрямого и прямого управления моментом.

Для методов, относящихся к первой группе, характерна недостаточность конструкторских решений и проработки технологического процесса производства ВИД, поэтому они не рассматриваются в данной статье. Судя по числу публикаций, в настоящее время имеются значимые наработки в области развития методов непрямого и прямого управления электромагнитным моментом ВИД. Техники непрямого управления моментом основаны на преобразовании мгновенного тока фаз двигателя в момент двигателя с помощью заранее известных статических характеристик. Общим для приведенных способов является измерение и управление косвенным параметром, имеющим прямую и линейную взаимосвязь с электромагнитным моментом ВИД. Так, метод использования функций разделения момента (ФРМ, в зарубежной литературе устоявшееся обозначение — torque sharing functions, TSF) основан на предположении, что каждая фаза ВИД создает независимый момент относительно других фаз [5]. В этом случае можно комбинацией управляющих воздействий на обмотку статора добиться снижения пульсаций момента, используя типовую структуру взаимного распределения моментов T_j в воздушном зазоре ВИД (рис. 1) с применением принципа ФРМ. Для этого вводится зависимость $T_j\,(\gamma_j,\, i_j)$, где T_j — момент, создаваемый обмоткой статора; γ_j — относительное положение зубца статора; i_j — ток статора для одной фазы.

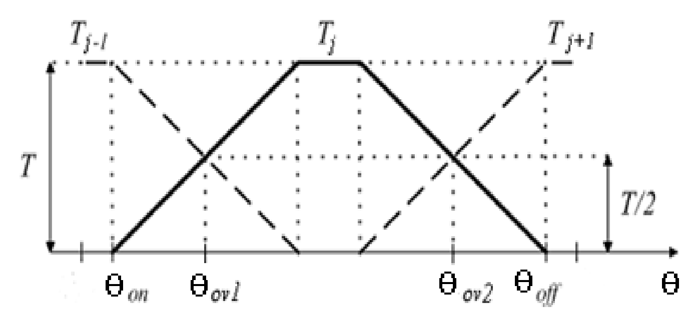


Рис. 1. Функции момента на валу ВИД

Согласно методу ФРМ [8] и зависимостям, приведенным на рис. 1, процесс формирования результирующего электромагнитного момента можно описать следующими соотношениями:

$$TSF(\theta_r) = \begin{cases} 0, & (0 < \theta_r < \theta_{on}) \\ f_{up}^{l}(\theta_r), & (\theta_{on} < \theta_r < \theta_{on} + \theta_{ov1}) \\ T_e, & (\theta_{on} + \theta_{ov1} < \theta_r < \theta_{ov2}) \\ f_{dn}^{l}(\theta_r) & (\theta_{ov2} < \theta_r < \theta_{off}) \\ 0 & (\theta_{off} < \theta_t) \end{cases}, \qquad (1)$$

где θ_r — текущее положение фазы ротора; $f_{up}^{l}(\theta_r)$, $f_{dn}^{l}(\theta_r)$ — моменты на валу двигателя в режиме перекрытия фазных обмоток при нарастающем и спадающем отрезках времени θ_{ov1} и θ_{ov2} соответственно; T_e — средний задаваемый момент; θ_{on} — угол включения обмотки; θ_{on} — угол отключения обмотки.

Для расчета момента в период перекрытия обмоток (для линейной ФРМ) можно использовать следующие соотношения [8]:

$$f_{up}^{l}(\theta_r) = \frac{T_e}{\theta_{ov}} \cdot (\theta_r - \theta_{on}),$$
$$f_{dn}^{l}(\theta_r) = T_e - \frac{T_e}{\theta_{ov}} \cdot (\theta_r - \theta_{off}). \qquad (2)$$

Результаты расчета требуемого момента на обмотку записываются в табличную модель ВИД, которая содержит соответствующие значения тока фазы статора, необходимого для обеспечения заданного момента. Повысить эффективность приведенного класса методов можно при применении различных пропорционально-интегральных (ПИ), пропорционально-интегрально-дифференцирующих (ПИД) регуляторов (рис. 2) по формированию импульсного тока статора целесообразной формы.

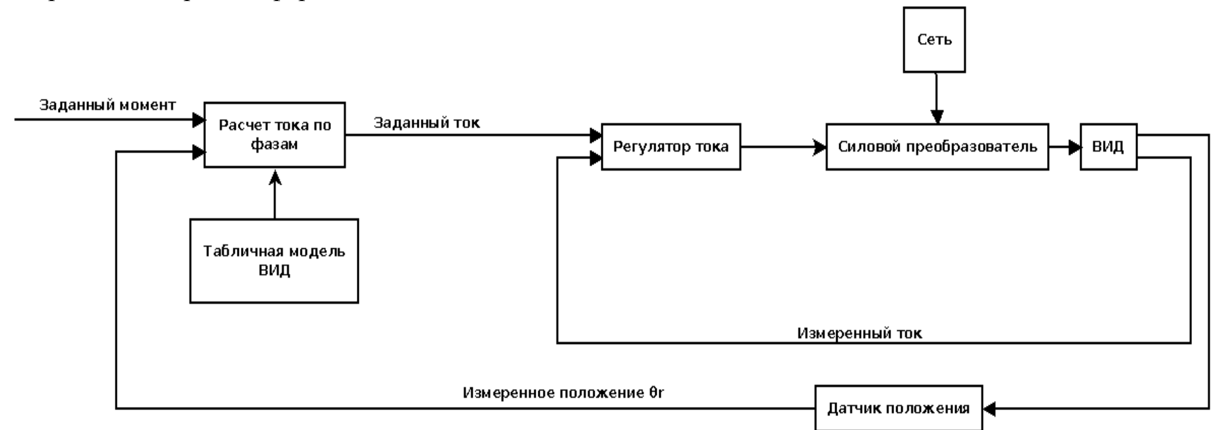


Рис. 2. Типовая схема системы управления с использованием ФРМ

Однако из-за существенных нелинейностей звеньев системы формирование момента на валу ВИД (с упомянутыми регуляторами) не дает приемлемого результата и появляется необходимость использования методов адаптивного или нейронечеткого управления [5]. Несмотря на простоту реализации данного метода, он не находит широкого применения, поскольку создаваемый момент на валу (при включении двух обмоток) является величиной, зависимой от влияния их взаимных индуктивностей. Для устранения приведенных выше недостатков используются

различные формы ФРМ, анализ и сравнение которых приведены в работе [9].

Альтернативным методом является также метод линеаризации управления по обратной связи [10–12], который часто используют при исследовании систем управления ВИД. Метод заключается в приведении нелинейной системы к линейной модели. При этом эффекты нелинейности и насыщения магнитопровода (стали) нивелируются за счет моделей, полученных из измеренных данных и моделей (рис. 3), построенных в системах конечноэлементного моделирования, например в программном пакете FEMM.

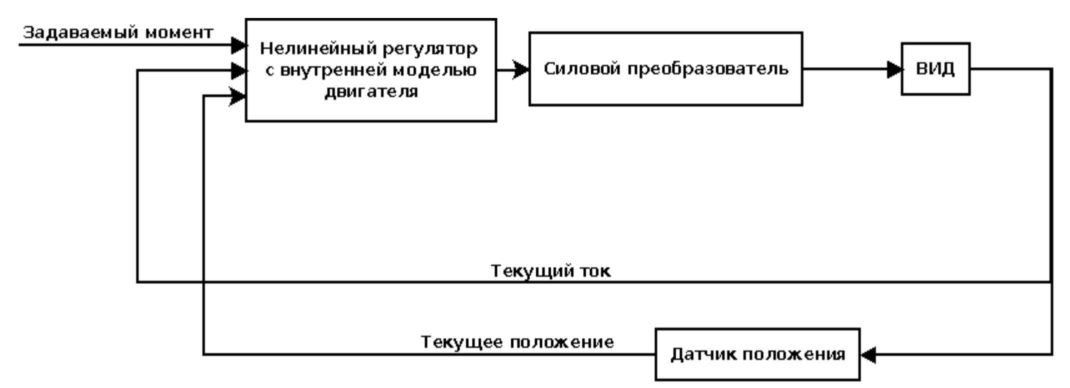


Рис. 3. Система управления с линеаризованной обратной связью

В данном случае необходимо располагать математическим описанием объекта управления в переменных состояния *X* «вход — выход», составленным как для динамической системы с сосредоточенными параметрами. При этом линеаризованные уравнения для многомерной системы записаны в стандартной форме:

$$x' = A(t)\cdot x(t) + B(t)\cdot u(t), \tag{3}$$

$$y(t) = C(t)\cdot x(t) + D(t)\cdot u(t), \tag{4}$$

где $A(t)$ — матрица объекта размерностью (n, n); $B(t)$ — матрица управления или входа размерностью (n, m); $C(t)$ — матрица выхода размерностью (l, n); $D(t)$ — матрица компенсации размерностью (l, m); $U(t)$ — матрица вектора входа; m — число входов; l — число выходов; n — размерность вектора состояния.

Если определить решение однородного матричного уравнения, полученного из уравнения (3) при условии $U(t) = 0$, и все элементы матриц A, B, C, D не зависят от времени в частном случае, то уравнение (3) можно записать:

$$x' = A\cdot x + B\cdot u, \tag{5}$$

а уравнение (4) с начальным условием ☒(t)$_{t=0}$ = x_0 в виде:

$$y(t) = C\cdot x + D\cdot u. \tag{6}$$

В этом случае переходную матрицу, описывающую свободное движение системы, можно представить из уравнения (5) при $U(t) = 0$ выражением:

$$\varphi'(t) = A\cdot\varphi(t), \tag{7}$$

где $\varphi(t)$ — переходная матрица соответствует экспоненциальной функции вида

$$\varphi(t) = e^{A\cdot t}. \tag{8}$$

Это позволяет записать общее решение уравнения (5) в виде:

$$x(t) = \varphi(t)\cdot x_0 +_0^t \varphi(t-\tau)\cdot B\cdot u(\tau)\,\partial\tau. \tag{9}$$

С учетом выражения (8) можно записать:

$$x(t) = \varphi(t)\cdot x_0 +_0^t e^{A\cdot(t-\tau)}(t-\tau)\cdot B\cdot u(\tau)\,\partial\tau, \tag{10}$$

где τ — выбранное приращение времени. При $U(\tau) = 0$ решением однородного уравнения является соотношение

$$x' = A\cdot x, \tag{11}$$

что позволяет записать:

$$x(t) = \varphi(t)\cdot x_0 = e^{A\cdot t}\cdot x_0, \tag{12}$$

а также использовать выражение (12) в матричной форме для выполнения моделирования.

Основной сложностью данного метода является построение нелинейной модели таким образом, чтобы линейное входное воздействие $U(t)$ соответствовало линейному изменению внутреннего состояния ВИД и были созданы условия исследования нелинейной модели по выбранным критериям устойчивости. Анализ такого подхода к поиску модели усложняется из-за ряда особенностей, связанных с высокими требованиями к точности представления модели ВИД, измерениям параметров тока и положения фазного угла ротора.

В настоящее время приобретают особую значимость также методы исследования ВИД, основанные на управ-

лении магнитным потоком [13, 14] при бездатчиковом управлении ВИД. Усовершенствованная математическая модель такого управления учитывает взаимную индуктивность обмоток [11] и оценку значения момента на валу двигателя из соотношения:

$$T \approx i \cdot \frac{\partial \lambda}{\partial \theta}, \tag{13}$$

где T — момент на валу ВИД; i — ток обмоток; λ — потокосцепление; Θ — угловое положение фазы ротора.

При этом примерная оценка потокосцепления определяется из выражения

$$v_j = R_s \cdot i_j + \frac{d\lambda_j}{d_t} \tag{14}$$

преобразование которого позволяет выделить оценку потока в виде

$$\lambda = \int (V - i \cdot R) \cdot dt\ . \tag{15}$$

После подстановки в (14) значения λ из (15) можно определить значение момента T на валу ВИД. Вычислительные процессы по приведенным уравнениям хорошо могут быть реализованы с помощью современной микропроцессорной техники и сигнальных процессоров. Такой подход к поиску возможности формирования безпульсирующего момента на валу позволяет выполнять управления ВИД без датчика поворота, с помощью зондирующих импульсов [15]. Однако такой подход не позволяет реализовать предполагаемую возможность по снижению пульсаций момента ВИД, а неопределенное состояние системы при запуске ВИД вызывает трудности в применении.

По мнению авторов, наибольшую привлекательность для математического исследования ВИД имеет **метод прямого управления моментом**, основанный на оценке текущего момента двигателя по данным датчиков: магнитного потока, положения, момента, тока, а также его коррекции по критерию минимума квадратичной ошибки. Структурная схема системы управления, реализующей указанный метод, приведена на рис. 4.

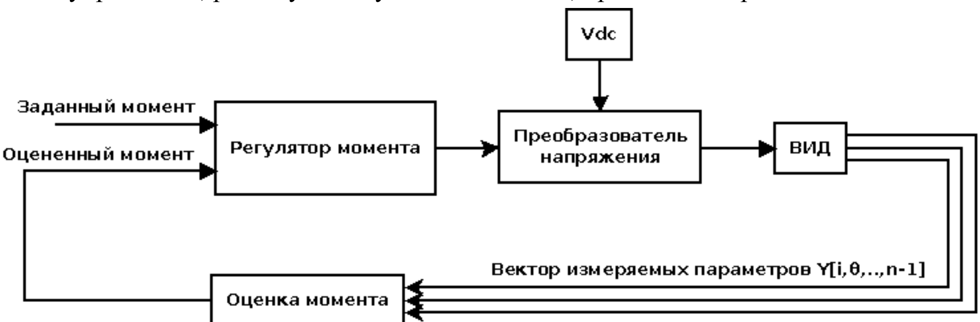


Рис. 4. Схема организации прямого управления моментом ВИД

При работе данной схемы вектор измеряемых параметров $Y[i, \theta, \ldots, n-1]$ поступает на блок «Оценка момента» на валу двигателя, результирующий сигнал с которого поступает на регулятор момента [5, 16]. Интерес представляет подход к оценке момента на валу ВИД с использованием характеристик $T(\Theta, i)$, которые хранятся в памяти контроллера. Типичная поверхность характеристик $T(\Theta, i)$, построенная для ВИД (схема 6/4), приведена на рис. 5.

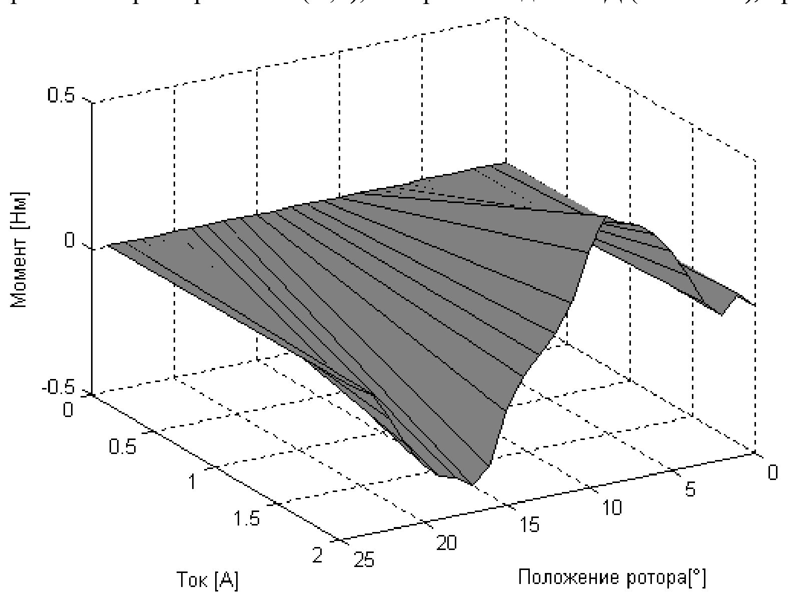


Рис. 5. Поверхность характеристик $T(\Theta, i)$

Применение расширенного вектора измеряемых параметров $Y\,[i, \theta, ..., n-1]$ для оценки момента позволяет, не используя косвенные параметры, точнее оценить фактическую величину текущего момента на валу ВИД в сравнении с методами непрямого управления. Следует отметить, что с увеличением размерности $Y\,[i, \theta, ..., n-1]$ появляется возможность (без изменения структуры системы управления) более точно оценивать пульсации момента от действия внешних сил и управлять значением формируемого момента на валу ВИД. Однако применение метода возможно при соответствии характеристик вычислительных средств повышенным требованиям: необходим достаточно большой объем памяти контроллера, в котором хранятся данные для реализации функции момента двигателя, а также высокая вычислительная нагрузка на управляющую микропроцессорную систему.

Выводы. Выполненный обзор существующих подходов к снижению пульсаций электромагнитного момента при исследовании вентильно-индукторного двигателя методами математического моделирования позволяет сделать следующие выводы.

— Существующие подходы к оценке возможности формирования момента на валу без пульсаций не учитывают влияние массы ротора на прогиб вала (изменение воздушного зазора между статором и ротором), что может существенно изменить результаты моделирования.

— При формировании результирующего момента на валу не учитывается возможность управления коэнергией электромеханического преобразователя, что снижает эффективность результатов оценки пульсаций электромагнитного момента вентильно-индукторного двигателя методами математического моделирования.

— Приемлемые методы (нейросетевые и нейронечеткие) снижения пульсаций момента предполагают офлайн обучение. Для них точность модели ВИД, на которой происходит обучение метода, является важным фактором. Однако в рассмотренных статьях не учитываются эффекты остаточной намагниченности ротора и статора, а также провисания ротора под действием силы тяжести, которые имеют значительное влияние на пульсации момента [3].

— Остаточная намагниченность ротора учитывается в работе [6]. Однако предлагаемая система управления занижает среднее значение формируемого момента на валу ВИД за цикл работы фазной обмотки.

Библиографический список

1. Карнаухов, Н. Ф. Коррекция механических характеристик частотного электропривода технологических машин в зоне малой скорости движения исполнительного механизма / Н. Ф. Карнаухов, М. Н. Филимонов, Д. А. Статовой // Наука, техника и технология XXI века (НТТ-2013) : мат-лы V междунар. науч.-техн. конф. / Кабардино-балкарский университет. — Нальчик, 2013. — С. 433.

2. Карнаухов, Н. Ф. Математическая модель вентильно-реактивного двигателя мехатронной системы при одноимпульсном питании / Н. Ф. Карнаухов, Г. В. Дзаян, Н. В. Русин // Математические методы в технике и технологиях (ММТТ-21) : сб. тр. XXI междунар. науч. конф. — Саратов, 2008. — Секц. 9, 14. — Т. 7. — С. 25–27.

3. Петрушин, А. Д. Оценка влияния неравномерности воздушного зазора на величину сил одностороннего притяжения ротора к статору вентильно-индукторной электрической машины / А. Д. Петрушин, Е. Е. Илясова // Вестник ВЭлНИИ. — 2011. — № 2. — Р. 84–93.

4. Suryadevara, R. Control techniques for torque ripple minimization in switched reluctance motor: An overview / R. Suryadevara, B.-G. Fernandes // IEEE 8th International Conference on Industrial and Information Systems : conf. proc. — Peradeniya, 2013. — P. 24–29.

5. Mousavi-Aghdam, S. R. A new method to reduce torque ripple in switched reluctance motor using fuzzy sliding mode / S.-R. Mousavi-Aghdam, M.-B.-B. Sharifian, M.-R. Banaei // Iranian journal of fuzzy systems. — 2012. — Vol. 9, № 1. — P. 97–108.

6. Divandari, M. Radial force and torque ripple optimization for acoustic noise reduction of SRM drives via fuzzy logic control / M. Divandari, A. Dadpour // 9th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications — INDUSCON 2010. — Sao Paulo, 2010. — P. 1–6.

7. Srinivas, P. DTC of switched reluctance motor drive using simplified torque equation / P. Srinivas // International Journal Of Advanced Research In Electrical, Electronics And Instrumentation Engineering. — 2015. — Vol 4, № 1. — P. 92–95.

8. Torque Ripple Minimization Scheme Using Torque Sharing Function Based Fuzzy Logic Control for a Switched Reluctance Motor / H.-S. Ro [et al.] // Journal of Electrical Engineering & Technology. — 2015. — Vol. 10, № 1. — P. 118–127.

9. Xue, X.-D. Evaluation of torque sharing functions for torque ripple minimization of switched reluctance motor drives in electric vehicles / X.-D. Xue, K.-W.-E. Cheng, N.-C. Cheung // Power Engineering Conference. — Sydney, 2008. — P. 1–6.

10. Feedback linearizing control of switched reluctance motors / M. Ilic-Spong [et al.] // IEEE Transactions on Automatic Control. — 1987. — Vol. 32, № 5. — P. 371—379.

11. Bae, H.-K. A novel approach to control of switched reluctance motors considering mutual inductance / H.-K. Bae, R. Krishnan // IEEE Industrial Electronics Conference. — Nagoya, 2000. — Vol. 1. — P. 369–374.

12. Panda, S.-K. Application of nonlinear control to switched reluctance motors: a feedback linearisation approach / S.-K. Panda, P.-K. Dash // IEEE Proceedings — Electric Power Applications. — 1996. — Vol. 143, № 5. — P. 371–379.

13. Lovatt H.-C. A flux controller that improves drive system performance by accounting for magnetic circuit saturation / H.-C. Lovatt // Power Electronics and Applications : Fifth European Conference. — Brighton, 1993. — P. 163–167.

14. Barrass, P.-G. Flux and torque control of switched reluctance machines / P.-G. Barrass, B.-C. Mecrow // IEEE Proceedings — Electric Power Applications. — 1998. — Vol. 145, № 6. — P. 519–527.

15. Петрушин, А. Д. Бездатчиковый пуск вентильно-индукторных электрических машин / А. Д. Петрушин, М. В. Чавычалов // Вестник РГУПС. — 2012. — № 3. — P. 34–38.

16. Castro S.-J., Andrada G.-P., Blanqué M.-B. Minimization of torque ripple in switched reluctance motor drives using an enhanced direct instantaneous control // International Conference on Electrical Machines. — Marsella, 2012. — P. 1021–1026.

References

1. Karnaukhov, N.F., Filimonov, M.N., Statovoy, D.A. Korrektsiya mekhanicheskikh kharakteristik chastotnogo elektroprivoda tekhnologicheskikh mashin v zone maloy skorosti dvizheniya ispolnitel'nogo mekhanizma. [Correction of mechanical characteristics of the production machine variable-frequency drive in the low velocity zone of the actuator movement.] Nauka, tekhnika i tekhnologiya KhKhI veka (NTT-2013): mat-ly V mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. [Science,processes and technology of the XXI century (NTT-2013): Proc. V Int. Sci.-Eng. Conf.] Kabardino-Balkarian State University, Nalchik, 2013, p. 433 (in Russian).

2. Karnaukhov, N.F., Dzayan, G.V., Rusin, N.V. Matematicheskaya model' ventil'no-reaktivnogo dvigatelya mekhatronnoy sistemy pri odnoimpul'snom pitanii. [Mathematical model of valve-jet engine of mechatronic system at single-pulse power supply.] Matematicheskie metody v tekhnike i tekhnologiyakh (MMTT-21) : sb. tr. XXI mezhdunar. nauch. konf. [Mathematical Methods in Engineering and Technology (MMTT-21): Proc. XXI Int. Sci. Conf.] Saratov, 2008, sections 9, 14, vol. 7, pp. 25–27 (in Russian).

3. Petrushin, A.D., Ilyasova, E.E. Otsenka vliyaniya neravnomernosti vozdushnogo zazora na velichinu sil odnostoronnego prityazheniya rotora k statoru ventil'no-induktornoy elektricheskoy mashiny.[Evaluation of air gap unevenness influence on magnitude of forces of one-way pull of rotor to the stator of valve-inductor of valve-inductor electrical machine.] Vestnik VELNII, 2011, no. 2, pp. 84–93 (in Russian).

4. Suryadevara, R., Fernandes, B.-G. Control techniques for torque ripple minimization in switched reluctance motor: An overview. IEEE 8th International Conference on Industrial and Information Systems: conf. proc. Peradeniya, 2013, pp. 24–29.

5. Mousavi-Aghdam, S. R., Sharifian, M.-B.-B., Banaei, M.-R. A new method to reduce torque ripple in switched reluctance motor using fuzzy sliding mode. Iranian journal of fuzzy systems, 2012, vol. 9, no. 1, pp. 97–108.

6. Divandari, M., Dadpour, A. Radial force and torque ripple optimization for acoustic noise reduction of SRM drives via fuzzy logic control. 9th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications — INDUSCON 2010. Sao Paulo, 2010, pp. 1–6.

7. Srinivas, P. DTC of switched reluctance motor drive using simplified torque equation. International Journal Of Advanced Research In Electrical, Electronics And Instrumentation Engineering, 2015, vol 4, no. 1, pp. 92–95.

8. Ro, H.-S., et al. Torque Ripple Minimization Scheme Using Torque Sharing Function Based Fuzzy Logic Control for a Switched Reluctance Motor. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2015, vol. 10, no. 1, pp. 118–127.

9. Xue, X.-D., Cheng, K.-W.-E., Cheung, N.-C. Evaluation of torque sharing functions for torque ripple minimization of switched reluctance motor drives in electric vehicles. Power Engineering Conference. Sydney, 2008, pp. 1–6.

10. Ilic-Spong, M. et al. Feedback linearizing control of switched reluctance motors. IEEE Transactions on Automatic Control, 1987,vol. 32, no. 5, pp. 371—379.

11. Bae, H.-K., Krishnan, R. A novel approach to control of switched reluctance motors considering mutual

inductance. IEEE Industrial Electronics Conference. Nagoya, 2000, vol. 1, pp. 369–374.

12. Panda, S.-K., Dash, P.-K. Application of nonlinear control to switched reluctance motors: a feedback linearisation approach. IEEE Proceedings — Electric Power Applications, 1996, vol. 143, no. 5, pp. 371–379.

13. Lovatt H.-C. A flux controller that improves drive system performance by accounting for magnetic circuit saturation. Power Electronics and Applications : Fifth European Conference. Brighton, 1993, pp. 163–167.

14. Barrass, P.-G., Mecrow, B.-C. Flux and torque control of switched reluctance machines. IEEE Proceedings — Electric Power Applications, 1998, vol. 145, no. 6, pp. 519–527.

15. Petrushin, A.D., Tchavychalov, M.V. Bezdatchikovyy pusk ventil'no-induktornykh elektricheskikh mashin. [Sensorless start of switched reluctance electric machines.] Vestnik RGUP, 2012, no. 3, pp. 34–38 (in Russian).

16. Castro S.-J., Andrada G.-P., Blanqué M.-B. Minimization of torque ripple in switched reluctance motor drives using an enhanced direct instantaneous control. International Conference on Electrical Machines. Marsella, 2012, pp. 1021–1026.

Поступила в редакцию 21.01.2016
Сдана в редакцию 22.01.2016
Запланирована в номер 23.03.2016